다변량통계기법을 이용한 열교환기의 Fouling Index 개발

진형대, 주영환*, 한종훈**
포항공과대학교 화학공학과, 포항공과대학교 화학공학과*, 포항공과대학교 화학공학과**

Development of heat exchanger fouling index using multivariate statistical process control

Hyungdae, Jin; Younghwan, Chu*; Chonghun, Han**
Department of Chemical Engineering, POSTECH, Korea, Department of Chemical Engineering, POSTECH*, Department of Chemical Engineering, POSTECH**

서론

Fouling은 열교환기 내부에 불순물이 deposit되어 열효율의 감소를 야기시키는 현상으로서 실제공정에서는 열교환기가 전체 투자비용에 작은 부분을 차지하지만, 그럼에도 불구하고 열교환기 fouling에 따른 비용 즉, 에너지손실, cleaning 비용, 유지비용, 생산손실 등 운전비용에서는 많은 비중을 차지한다. 따라서 fouling을 파악, 대처하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다. 일반적으로 Fouling을 측정하기 위해서 hot stream, cold stream의 inlet, outlet온도, 유량, 유속, 밀도, 점도, 열용량 등을 측정하는데 thermocouple을 이용 온도제어를 하고 tube의 지름을 조절하고 유량계를 이용하여 유량과 유속을 제어한다. 그러나, 실제 공정에서는 이러한 물리량들이 고정되지 않고 계속적으로 변화 할 뿐만 아니라 이들에 대한 실시간 측정이 불가능한 상황이 대부분이고 disturbance, noise의 영향으로 인해 측정되는 데이터들의 정확도가 떨어진다. 따라서 fouling 현상과 관련된 공정변수를 찾아내어 이들의 측정값에 기반하여 통계적인 기법으로 fouling 현상을 추정한다. 본 연구에서는 다변량 통계기법인 주요요인분석(principal component analysis) 을 적용하여 fouling index 구성하여 fouling정도를 data를 이용하여 간접적으로 추정할 수 있으므로 적은 비용으로 fouling현상을 쉽게 파악할 수 있다. 그리하여 적절치 않은 시간의 S/D으로 인한 에너지 비용 증가, 제품의 생산량 감소, cleaning 비용의 증가 등을 방지할 수 있다. 그리고 fouling 정도를 on-line상으로 실시간 모니터링을 할 수 있다면 optimal cleaning time을 찾을 수 있어 공장에서의 생산성 증가와 물질적, 금전적 손실을 미연에 방지 할 수 있다. 열교환기의 fouling 정도를 파악하여 cleaning 시점을 결정하는 것은 운전비용 절감에 중요한 부분을 차지한다. 쉽게 공정을 분석할 수 있는 SPC (Statistical process control) 에 기반한 fouling index를 고안하였다.

본론

이 공정은 삼성종합화학PP (polypropylene) Process이다. 이 공정은 A-train, B-train으로 나누어져 있으며, A-train은 액상 반응기 2개, 기상반응기 2개로 이루어져 있으며, B-train은 액상반응기 2개, 기상반응기 1개로 이루어져있다. 보통 A-train에서 Block injection을 생산하고 B-train에서는 Random injection을 주로 생산한다. 이 공정은 각각 약 20개의 grade를 가지고 있다. 대상 공정으로 삼은 것은 A-train의 3번째 반응기, 즉 기상반응기의 열교환기를 대상으로 하였다. 여기서 열교환기는 2개가 series로 연결되어 있고 가장 기본적으로 사용되는 shell-and-tube형태를 가진다

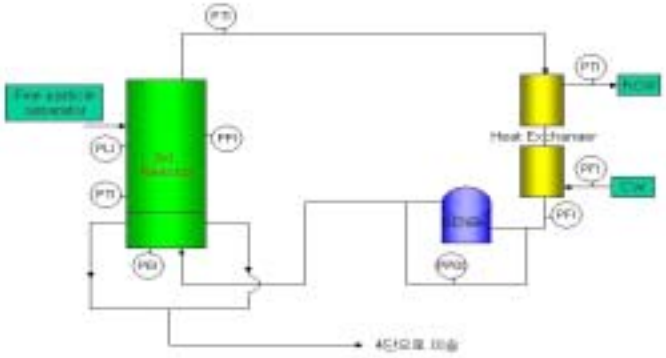

그림 1. Schematic of Objective Process

이 plot은 2001년 5월부터 2001년 12월까지, 1시간 sampling time의 data를 이용하였다. U (overall heat transfer coefficient) 대신, UA를 계산한 이유는 열교환기 내부의 면적 (A)도 fouling이 됨에 따라 감소하기 때문이다.

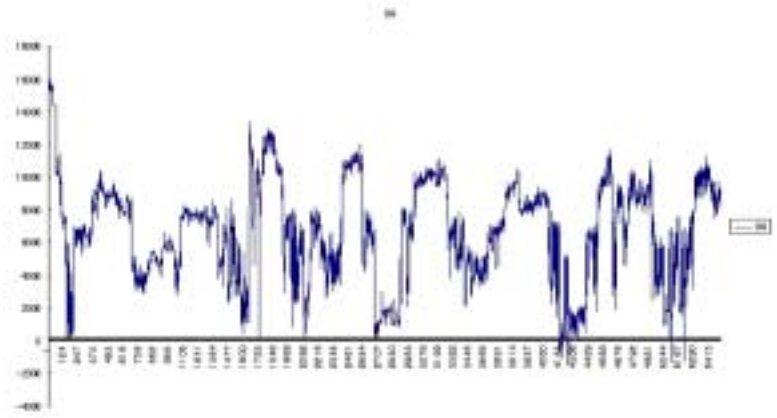

그림 2. UA plot

보는 바와 같이, 이 plot은 어떤 뚜렷한 경향성 (7월에 S/D하였으므로 값 차이가 확실하게 나야 한다. 약 1700번) 이 관찰되지 않는다. 그 이유는 grade가 변하면서 조업조건의 변화 즉, 온도, 레벨, 압력 등이 변하고, 그에 따라 sensor값이 틀려지는데 매시간 바뀌므로 값을 지시하더라도 random error가 발생할 것이며 작지만 계절적인 변화도 영향을 미치기 때문이다. 그러므로 UA 즉, fouling resistance로 예측 하는데 에는 약간의 무리가 따른다.
모든 데이터를 이용하여 PCA로 projection 시켰다.
이 plot은 먼저 잘못된 공정해석이 되지 않도록 데이터 전처리를 거쳐 outlier를 제거하였다. 기간은 2000년 5월 21일에서 2002년4월 14일이며, Sampling time은 3hr이다. 모든 데이터들이 같은 조업 영역을 가지고 있는 것을 확인 할 수 있다. 조업이 시간에 따라서 왼쪽으로 진행된다. 그러므로 오른쪽에서 점점 왼쪽으로 갈수록 fouling 이 진행되고 있다.

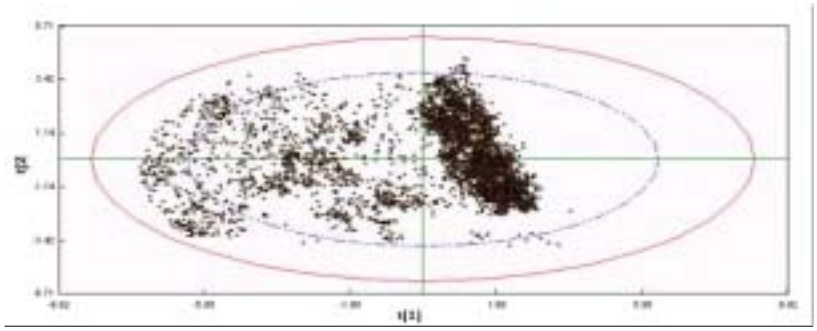

그림 3. PCA plot of all data

loading coefficient를 확인해 보았다. 압력차와 반응기 온도, ampere 가 중요한 변수라는 사실로 인해 조업이 왼쪽으로 진행될수록 Fouling이 진행됨을 검증할 수 있다.

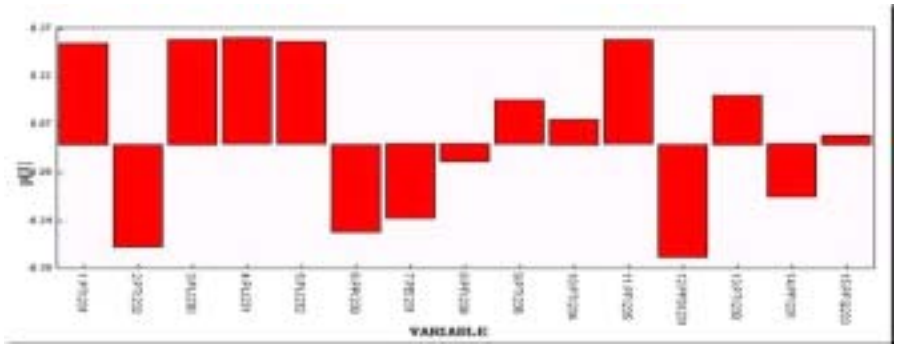

그림 4. Loading Coefficient

먼저 PCA 분석을 통해 PC1이 fouling을 나타내는 축이라는것을 알아낼 수 있었다. loading coefficient를 가지고 modeling을 하였다.

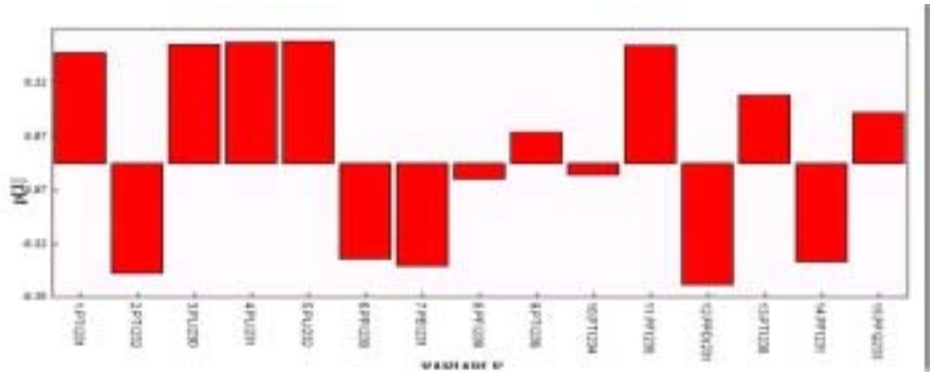

그림 5. Loading coefficient

Fouling에 영향을 주는 factor는 PTI232, PLI230, PEI231, PFI235 그리고 PPDI231이다. PTI232은 PTI231, PPI230과 관련이 있고, PLI230은 Controller이고 나머지는 indicator이다. 그리고 PTI236, PTI234, PTI230은 PFI238과 관련이 있는데 Combination으로는 fouling 정도를 나타낼 수 있겠지만 각각은 나타내는데 약간 무리가 따른다. 최종적인 변수의 물리적인 의미를 파악해보면, 열교환기내 fouling이 진행되면서 압력차는 커지고, 그것에 의해 recycle되는 vapor의 양은 점점 감소할 것이다. 반응기 잠열을 제거하면서 온도를 제어하는데 vapor양이 줄어듬으로 온도 제어가 제대로 되지 않아 반응기내 온도는 상승할 것이고, slurry상태의 feed들로 인해 반응기내 level 감소와 impeller의 ampere가 증가할 것이다.

그래서 주요 factor의 Coefficients를 가지고 Weights를 제안하였다. 왜냐하면 각각의 변수들이 fouling에 따라 각각 다른 영향을 받기 때문이다.

새로운 fouling index를 제안하면,

$$FI = -(-(0.1912 * PTI232) + (0.2087 * PLI230)$$

$$-(0.1802 * PEI231) + (0.2061 * PFI235) - (0.2138 * PPDI231))$$ 이 된다.

Fouling index 값이 0에서 1사이에서 나타낼 수 있도록 위의 새로운 index로 구한 값을

$$X_{new} = \frac{X_{old} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$ 으로 나타내었다.

새로운 index로 fouling의 정도를 계산해 보았다. 그리고 새롭게 제안된 fouling index를 검증하기위

해 cooling water의 heat flux를 사용하였다. 비록 계절, grade에 관한disturbance가 있을 수는 있지만 얼마나 열이 교환되었는지는 충분히 approximation 할 수 있을 것이다.

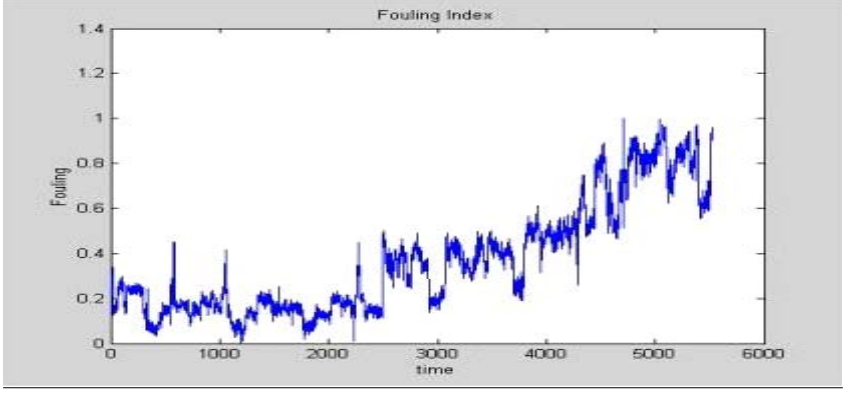

그림 6. Fouling plot using new fouling index

Q값은 열교환기 내에서 CW가 얻은 열량으로 적어질수록 fouling이 되어 열교환이 안 되는 상태라고 생각할 수 있다.

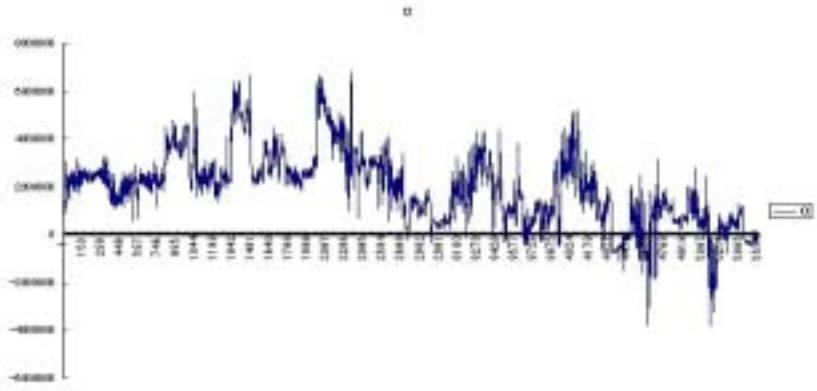

그림 7. Plot of CW heat flux

결론

fouling에 영향을 미치는 Parameter는 유속, 온도, 점도, 밀도 등 여러가지가 있다. fouling을 나타내는데 사용되는 U (overall heat transfer coefficient)는 실제공정에서는 사용되기가 매우 어렵다. 왜냐하면 fluids의 성질이 많이 변하기 때문이다. 그래서 지금까지 실제 공정에서 fouling 정도를 측정하는 일은 매우 어려웠다. 그 결과 optimal cleaning time을 선정할 수없어 fouling에 의해 물질, 금전 손실이 지금까지 막대한 수준이었다. 만약 fouling을 실시간 on-line 상태로 측정 가능하다면, 조업하는데획기적인 효율성을 가져다 줄것이다.

U로 계산된 여러가지 문제점을 해결하기위해 다변량 통계기법을 이용한 index는 시간에 따른 매우 다른물리적 특성과 다양한 조건에서도 잘 적용되었다. 실제 공정 데이터를 이용하여 제안된 새로운 fouling index가 비록 여러가지 변수들의 간단한 linear combination으로 표현 되었지만, 예상했던 것과 매우 유사한 fouling 정도를 나타내는 것을 알 수 있다.